

## EFFECTOS DINAMICOS ALEATORIOS EN TUNELES

E. ALARCON ALVAREZ

Dr. I.C.C.P. (E.T.S.I.I. Sevilla)

M. GARCIA SOLIS

I.I. (E.T.S.I.I. Sevilla)

Se presenta un procedimiento para el estudio de los efectos dinámicos en revestimientos de túneles sometidos a terremotos. La interacción terreno-estructura se plantea en el dominio de la frecuencia mediante el uso de la F.F.T. y la definición de una matriz de rigidez dinámica del terreno. La sollicitación es un conjunto de terremotos simulados en ordenador. Se plantea una solución aproximada mediante el uso de los modos de un sistema asociado.

El estudio de los efectos dinámicos en túneles registró un considerable impulso como consecuencia de la presión militar para conseguir refugios fiables en la guerra nuclear.

Métodos en general analíticos, fueron presentados con objeto por DORRIS (1965), LUSCHER (1964) WIEDERMANN (1960), MOW (1964), TOSHIMARA y otros - (1963).

El desarrollo de los métodos numéricos - produjo la inmediata aplicación de los mismos mediante modelos simplificados de masas y muelles - elastoplásticos DAWKINS (1969) o por aplicación del método de los elementos finitos WILSON (1970).

El continuado estudio de este último, así como el uso de técnicas complementarias como la FAST FOURIER TRANSFORM y los procedimientos de MONTE - CARLO han permitido el tratamiento de los problemas dinámicos de ingeniería civil.

En este estudio presentamos una técnica - de análisis del comportamiento de revestimientos de túneles a poca profundidad, frente a la acción de terremotos. Métodos semejantes han sido presentados para su aplicación en presas y vasijas de reactores por la escuela de CHOPRA, vg. GUTIERREZ y CHOPRA - (1976).

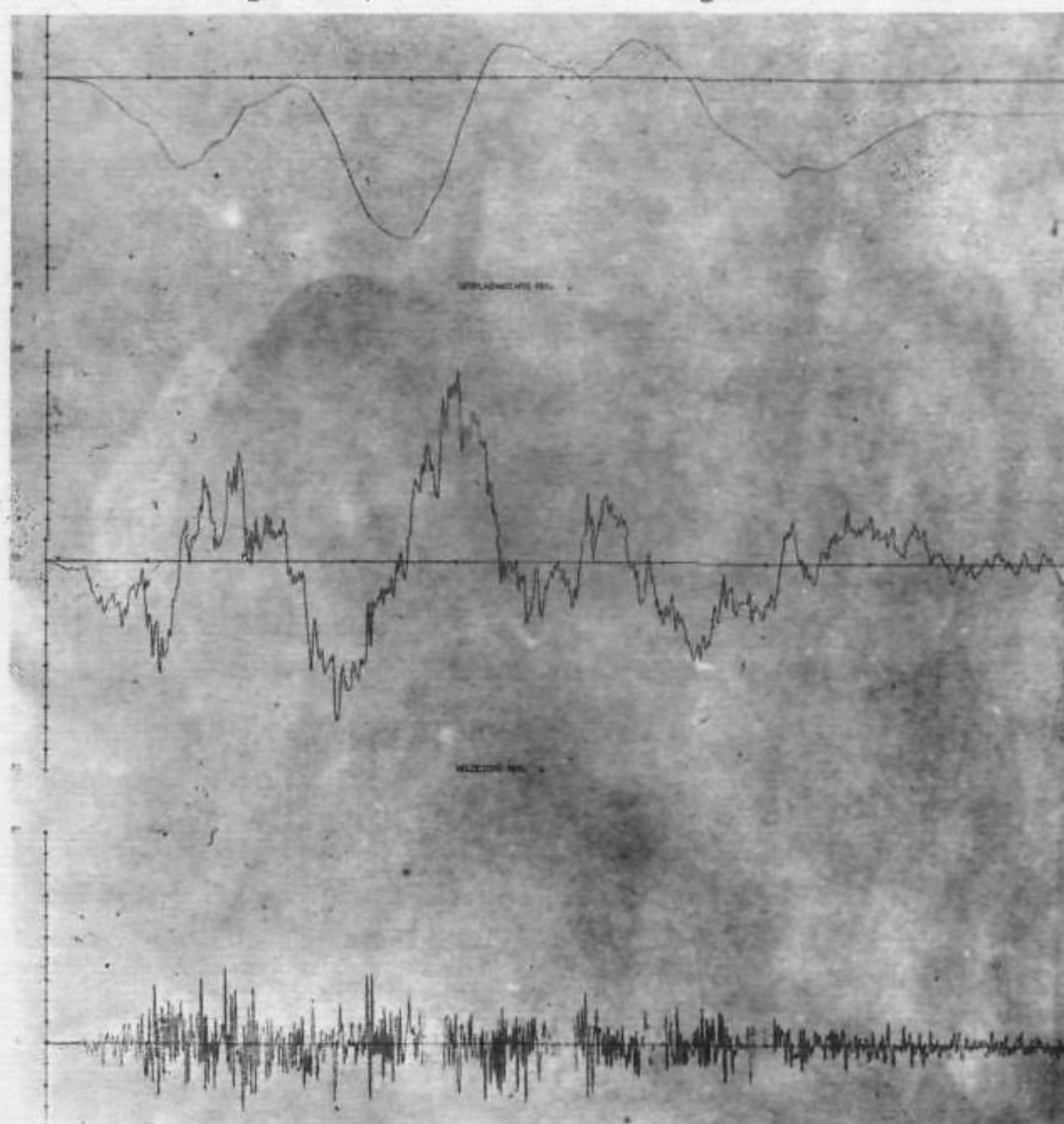
Mediante este procedimiento se analizan - las respuestas de la estructura a un conjunto de terremotos simulados y, sobre los resultados, se plantean diversas conclusiones de tipo estadístico.

### 1. La sollicitación

El primer paso ha consistido en simular -

el conjunto de sollicitaciones a que debería someterse la estructura. Como es bien sabido existen diversos procedimientos para conseguirlo, bien mediante - un modelado del fenómeno físico RASCON (1968), bien mediante el ajuste de un ruido blanco filtrado a espectros normalizados (RUIZ y PENZIEN 1971, SARAGONI y HART 1972), bien con técnicas más sofisticadas (SHI NOZUKA 1974).

Un ejemplo típico del conjunto generado para este trabajo se presenta en la figura 1





correspondiente al caso de un terremoto de 20 seg.- de duración.

En general los resultados que se obtienen corresponden a datos medidos en la superficie. Ello obliga a una estimación posterior del movimiento a la profundidad en estudio, que se puede realizar mediante un proceso de deconvolución, el cual implica la necesidad de adoptar hipótesis sobre la propagación de ondas sísmicas en las proximidades de la superficie del terreno. El método que empleamos elimina este inconveniente por completo cuando se trata de estructuras exteriores y aminorar los errores para los casos de construcciones enterradas.

## 2. El Terreno

Según veremos más adelante, el uso de una técnica de subestructuración sirve para estudiar por separado el terreno y la estructura, lo que unido a la resolución del problema en el dominio de la frecuencia permite tratar fácilmente el caso viscoelástico.

Los resultados que presentamos corresponden, sin embargo, al caso elástico lineal.

## 3. El problema dinámico

### 3.1. Planteamiento general

Como es bien sabido las ecuaciones del movimiento del sistema suelo-estructura son

$$\underline{M} \ddot{\underline{x}} + \underline{c} \dot{\underline{x}} + \underline{k} \underline{x} = \underline{F}(t) \quad (3.1.)$$

que mediante la matriz modal  $\underline{\phi}$  se desacoplan produciendo, a través de

$$\underline{x} = \underline{\phi} \underline{\xi} \quad (3.2.)$$

$$\ddot{\underline{\xi}}_m + 2\zeta_m \omega_m \dot{\underline{\xi}}_m + \omega_m^2 \underline{\xi}_m = \underline{\phi}_m^T \underline{F}(t) = \underline{F}_m(t) \quad (3.3.)$$

Mediante la transformación de FOURIER

$$\underline{F}_m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \underline{F}_m^*(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.4.)$$

La respuesta a cada  $\underline{F}_m^*(\omega) e^{i\omega t}$  es

$$\underline{\xi}_m^*(\omega) = \frac{\underline{F}_m^*(\omega)}{-\omega^2 + 2i\omega \zeta_m \omega_m + \omega_m^2} \quad (3.5.)$$

que con una síntesis posterior,

$$\underline{\xi}_m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \underline{\xi}_m^*(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.6.)$$

El uso de (3.2.) conduce a la respuesta definitiva.

### 3.2. Subestructuración

Si denominamos  $\underline{x}^t$  a los movimientos totales de la estructura, las ecuaciones a resolver son

$$\underline{M} \ddot{\underline{x}}^t + \underline{c} \dot{\underline{x}}^t + \underline{k} \underline{x}^t = \underline{R}(t) \quad (3.7.)$$

$$\text{Poniendo } \underline{R}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \underline{R}^*(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.8.)$$

se podría obtener  $(\underline{x}^t)^*$  a partir del sistema

$$\left[ -\omega^2 \underline{M} + i\omega \underline{c} + \underline{k} \right] (\underline{x}^t)^* = \underline{R}^*(\omega) \quad (3.9.)$$

y, a continuación, reconstruir el resultado en el tiempo.

Por su parte, si no existiera revestimiento, los movimientos del terreno serían  $\underline{r}_{so}(t)$  mientras que la presencia de la estructura conduce a  $\underline{r}_s(t)$ . La interacción se refleja en la diferencia  $\underline{r}_s - \underline{r}_{so}$  que se puede pasar al campo de la frecuencia y relacionar con las fuerzas de interacción  $\underline{R}^*(\omega)$  que actúan en el suelo, mediante una matriz de rigidez dinámica del terreno  $\underline{X}_s^*(\omega)$

$$\underline{R}^*(\omega) = \underline{X}_s^*(\omega) \left[ \underline{r}_s^*(\omega) - \underline{r}_{so}^*(\omega) \right] \quad (3.10.)$$

Las condiciones de congruencia y equilibrio en el contorno son, respectivamente,

$$\underline{r}_s^* = (\underline{x}^t)^* \quad (3.11.)$$

$$\underline{R}^*(\omega) = -\underline{R}^*(\omega) \quad (3.12.)$$

y ello conduce a la ecuación final de control del sistema.

$$\left[ -\omega^2 \underline{M} + i\omega \underline{c} + \underline{k} + \underline{X}_s^*(\omega) \right] (\underline{x}^t)^* = \underline{x}_s^*(\omega) \cdot \underline{r}_{so}^*(\omega) \quad (3.13.)$$

Conocidos  $\underline{x}_s^*(\omega)$  y  $\underline{r}_{so}^*(\omega)$  podríamos obtener  $\underline{x}^t$  y,

mediante síntesis de FOURIER, reconstruir los movimientos correspondientes.

La ecuación (3.13.) puede hacerse más tratable si se busca no el movimiento total  $\underline{x}^t$  sino el relativo  $\underline{x}$  al de cuerpo rígido. Si se supone despreciable la contribución del término de amortiguamiento frente al de inercia, el resultado final es

$$\left[ -\omega^2 \underline{M} + i\omega \underline{c} + \underline{k} + \underline{X}_s^*(\omega) \right] \underline{x}^* = -\underline{a}_h^* \begin{bmatrix} N_1 \\ 0 \\ N_2 \\ 0 \\ N_n \\ 0 \end{bmatrix} - \underline{a}_v^* \begin{bmatrix} 0 \\ N_1 \\ 0 \\ N_2 \\ 0 \\ N_n \end{bmatrix} \quad (3.14.)$$

donde  $\underline{a}_h^*$  y  $\underline{a}_v^*$  son las aceleraciones horizontal y vertical transformadas.

La resolución de este sistema es mucho más asequible ya que sustituye una multiplicación matricial en el segundo miembro por un escalado del vector masa.

### 3.3. Problema asociado

La presencia del término  $\underline{x}_s^*(\omega)$  impide el uso de la técnica modal. Se han realizado intentos de utilizar un sistema asociado para definir unos modos que, mediante superposición de tres o cuatro formas,



permitán obtener resultados sin necesidad de recurrir a la solución exacta del sistema. Para ello es preciso que estos modos sean capaces de representar el medio en estudio.

Si llamamos  $\underline{K}^* = \underline{K} + \underline{x}_s^* (0)$  los modos son - tales que

$$\underline{\phi}^T \underline{M} \underline{\phi} = \underline{I}$$

$$\underline{\phi}^T \underline{K} \underline{\phi} = \underline{\lambda}^2$$

y la ecuación

$$\left[ \underline{K}^* + \underline{\phi}^T \underline{C} \underline{\phi} + \underline{\lambda} (w) \right] \underline{z} = - \underline{\phi}^T \left\{ \underline{a}_h^* \begin{bmatrix} \underline{M}_1 \\ \underline{C}_1 \\ \underline{K}_1 \end{bmatrix} + \underline{a}_v^* \begin{bmatrix} \underline{M}_1 \\ \underline{C}_1 \\ \underline{K}_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.15.)$$

donde  $\underline{\lambda} (w) = \underline{\phi}^T (\underline{x}_s^* + \underline{x}_s^* (0)) \underline{\phi}$

#### 3.4. Tratamiento de los resultados

Los resultados obtenidos pueden agruparse según los parámetros de interés. En general, los valores máximos de tensiones y deformaciones, el número de cruces del umbral cero, etc. son analizados. La figura 2

presenta las deformaciones longitudinales máximas esperables en un túnel circular en función de su radio y para profundidad del centro del círculo superior a  $3R$ . La representación es comparada con la distribución de GUMBEL (1954)

4. Agradecimiento. Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración del centro de cálculo de RENFE, y, en especial, de Jesús GOMEZ MARTIN I.C.C.P.

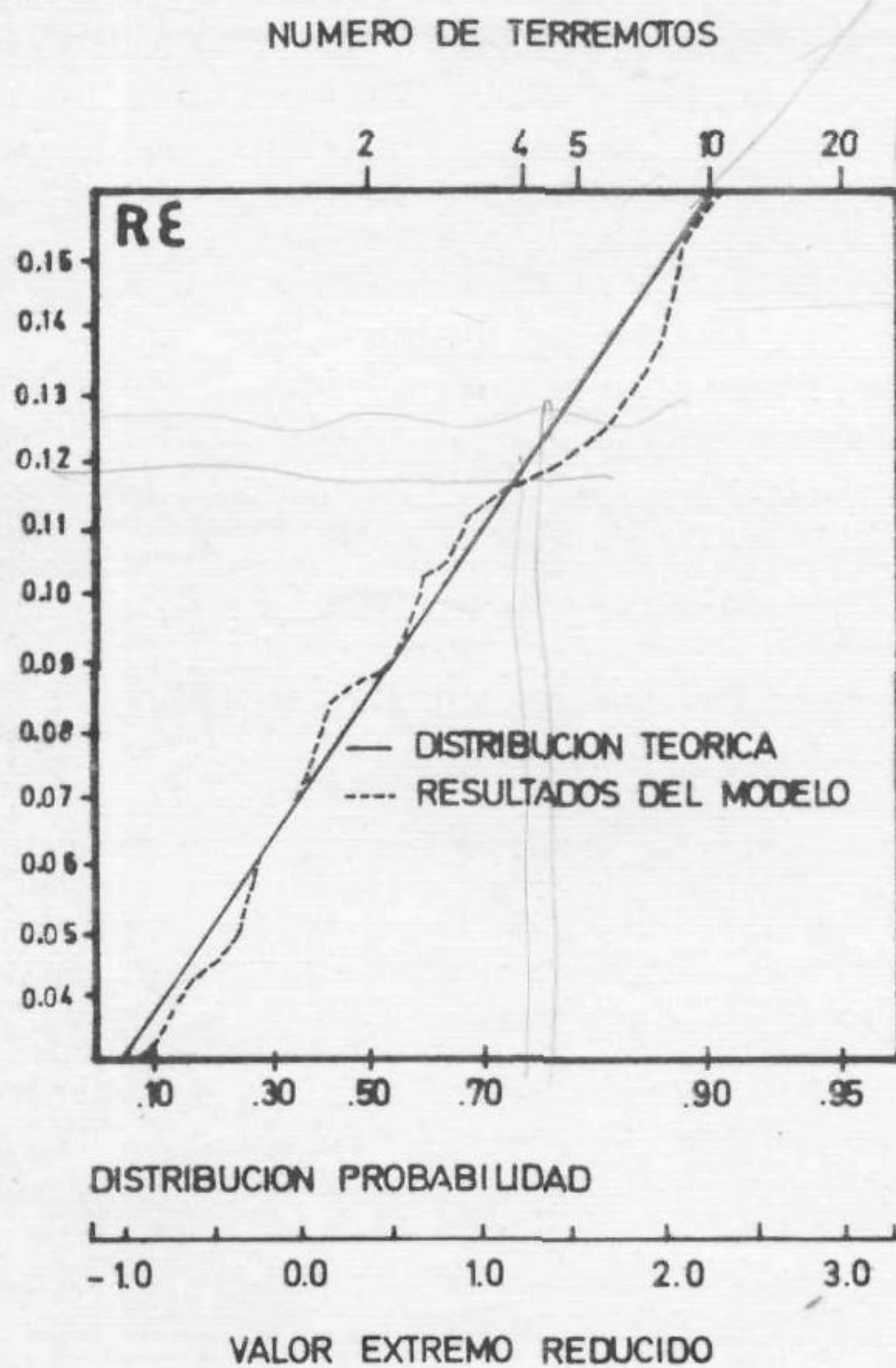


FIGURA 2.



Bibliografía

- DAWKINS: "Analysis of tunnel liner-packing systems. EMC.ASCE Junio 1969.
- DORRIS: "Response of horizontally oriented buried - cylinders to static and dynamic loading". U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station. 1965.
- GUMBEL: "Extreme value in aeronautics. Journ. of Aeron Sci. June 1954.
- GUTIERREZ y CHOPRE: "A substructure method for earthquake analysis of structure-soil interaction", California Berkeley 1976.
- LUSCHER Y HOEG: "The interaction between a structural tube and the surrounding soil. Air Force Weapons Laboratory (1964).
- C.C.MOW: "Dynamic response of lined and unlined underground openings". Rand Corporation 1964.
- RASCON Y CORNELL: "Strong motion earthquake simulation" MIT 1968.
- RUIZ Y PENZIEN: "Stochastic seismic response of structures" Journal E.M.D. ASCE April - 1971.
- SARA GONI Y HART: "Nonstationary analysis and simulation of earthquake ground motions" California Los Angeles 1972.
- SHINOZUKA: "Digital simulation of random processes with the aid of FFT technique" Univ. Waterloo (1974)
- WIEDERMANN: "The interaction of buried structures - with ground shock" Air Force Special weapons Center (1960)
- WILSON: "A nonlinear F.E.C. for analyzing Blast Response. USAEWES. Jan. 1970.
- YOSHIHARA, ROBINSON Y MERRITT: "Interaction of plane elastic waves with - an elastic cylindrical shell". Office of naval research department of the navy (1963)